



Le calcul de l'éclairement solaire sur plans inclinés

Bernard Bourges

► To cite this version:

Bernard Bourges. Le calcul de l'éclairement solaire sur plans inclinés. La météorologie, 7ème série, 1986, 7ème série (n°11 - Février 1986), pp.58-68. hal-00993160

HAL Id: hal-00993160

<https://hal.science/hal-00993160>

Submitted on 22 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le calcul de l'éclairement solaire sur plans inclinés

par

B. Bourges *

RESUME

Plusieurs algorithmes de calcul de l'éclairement solaire global, sur des surfaces diversement orientées, sont passés en revue et analysés. Ces algorithmes sont destinés au calcul de valeurs instantanées ou de sommes horaires. Ils n'utilisent, comme données de départ, que les mesures de rayonnements global et diffus sur plan horizontal. Leurs résultats sont comparés à des données mesurées à Trappes et à Carpentras pendant plusieurs années. Pour le plus précis d'entre eux, la précision de reconstitution des moyennes annuelles atteint 1 à 2 % ; elle est de 5 % pour les moyennes mensuelles. Ceci correspond à un progrès important par rapport à l'algorithme classique, basé sur la répartition isotrope du flux diffus du ciel. Ce dernier conduit à une sous-estimation systématique de 10 % pour les plans orientés au sud avec de larges variations saisonnières.

ABSTRACT

Various algorithms for computing global solar irradiance on tilted planes (from measured values, global and diffuse, on horizontal plane) are reviewed and analysed. Their results are compared with measured data at Trappes and Carpentras for three years. For some of them, the accuracy is within 1 or 2 % for yearly averages and within 5 % for monthly averages. Improvement is quite significant, if the comparison is made with the usual and so-called "isotropic" algorithms, which leads to systematic underestimation (10 % for south-oriented planes and large seasonal bias).

INTRODUCTION

Les applications de l'énergie solaire sont aujourd'hui fort nombreuses : thermiques, - "actives" ou "passives" -, thermodynamiques, photovoltaïques... Dans ce cadre, il n'est plus besoin de démontrer l'intérêt présenté par un calcul précis du rayonnement solaire reçu par des plans inclinés. Pour tous ces systèmes, en effet, la connaissance du rayonnement reçu par les dispositifs de conversion est un préalable indispensable à l'estimation des performances globales. A nos latitudes, la position optimale des "capteurs" est souvent caractérisée par une orientation sud et une inclinaison proche de la latitude. Pour les systèmes "passifs", par contre, c'est l'énergie reçue par des surfaces verticales qui intéresse le concepteur. Or les réseaux météorologiques ne mesurent, en règle générale, que le rayonnement global reçu par un plan horizontal. Parfois, les rayonnements diffus et direct, dont la mesure est plus délicate, font également l'objet de relevés.

De nombreux modèles de calcul ont été proposés pour pallier cette insuffisance. Le plus connu, le plus utilisé et sans doute le plus simple, a été publié par Liu et Jordan (1) ; il est basé sur l'hypothèse de la répartition isotrope du flux solaire diffus provenant du ciel.

Cette hypothèse est depuis longtemps mise en question, grâce à des mesures précises, notamment celles de Valko (8). Ces mesures ont montré que par ciel clair la luminance du ciel était nettement plus forte dans la zone circo-solaire, à proximité immédiate du soleil, et dans les zones de faible hauteur angulaire, proches de l'horizon (Fig. 1).

Différents modèles ont été mis au

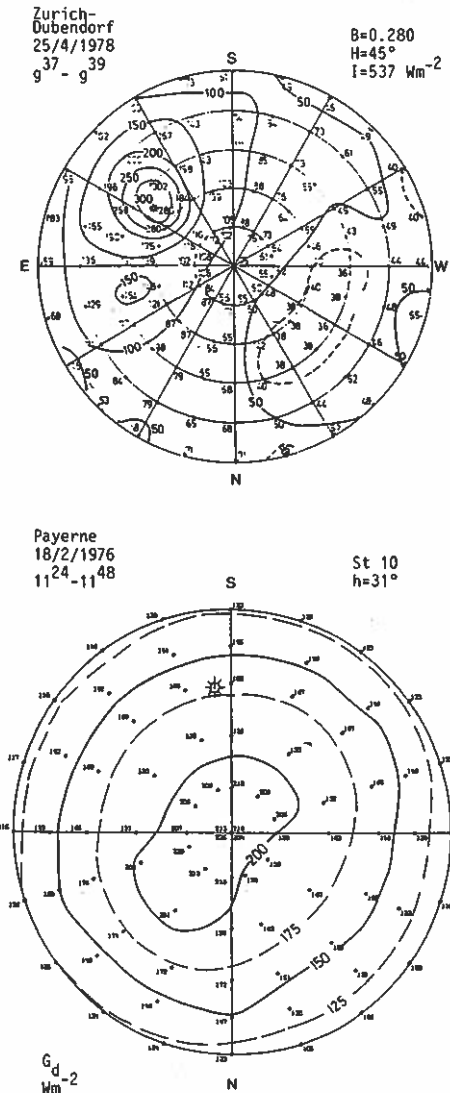


Fig. 1 : Distribution angulaire de la luminance diffuse du ciel (en unités relatives), d'après Valko (8) :
(a) Ciel clair, fort trouble
(b) Ciel couvert (altrostratus)

* Ingénieur - Conseil, RENNES

point pour prendre en compte cette anisotropie du rayonnement diffus du ciel. Cependant, aucun de ces modèles n'a, jusqu'à présent, fait l'unanimité et les utilisateurs préfèrent s'en tenir au modèle classique de Liu et Jordan ; celui-ci présente en outre l'avantage de fournir des estimations conservatoires, pessimistes par rapport à la réalité pour les inclinaisons et orientations usuelles.

Il semble néanmoins possible aujourd'hui d'effectuer un bilan général objectif de toutes ces tentatives. Des campagnes de mesures très soignées ont en effet été lancées un peu partout dans le monde ces dernières années. Des échantillons de mesures représentatives sur plans inclinés sont de ce fait disponibles. C'est le cas par exemple en France où, avec le soutien de la DGRST, la Direction de la Météorologie a effectué à Trappes et Carpentras des mesures sur différents plans pendant plusieurs années (7).

Ces données ont été aimablement mises à notre disposition par la Direction de la Météorologie. Nous les avons utilisées pour analyser et comparer quatre modèles différents de calcul du rayonnement solaire sur plan incliné.

Il convient de préciser que nous ne nous sommes intéressés ici qu'aux modèles de calcul adaptés au traitement de valeurs instantanées ou intégrées sur un pas de temps faible (une heure au moins). Nous avons utilisé ces méthodes pour estimer, entre autre, des sommes mensuelles ou annuelles d'irradiation solaire. Cependant le lecteur ne retrouvera pas ici l'analyse des méthodes de reconstitution spécifiquement adaptées au calcul de ces sommes mensuelles, à partir d'autres valeurs mensuelles caractéristiques, durée d'insolation ou irradiation globale sur plan horizontal par exemple.

LES MODELES ETUDIES

Le rayonnement solaire incident sur une surface quelconque, d'inclinaison s , est la somme de trois composantes : rayonnement direct du soleil, rayonnement diffus du ciel et rayonnement diffus réfléchi par le sol.

$$H_T = B_T + D_T + D_R$$

Le calcul du rayonnement direct sur un plan quelconque ne pose pas de problème particulier ; il s'agit d'un simple traitement géométrique à partir de la position angulaire du soleil et de la connaissance du rayonnement solaire direct en incidence normale :

$$B_T = B \cdot \cos i$$

ou, lorsque seuls l'éclairement global et l'éclairement diffus sur un plan horizontal sont connus :

$$B_T = (H - D) \cdot \cos i / \sin h$$

L'angle d'incidence du rayonnement direct sur la surface considérée, i , ainsi que la hauteur du soleil, h , peuvent être calculés à l'aide de formules classiques (voir par exemple (14)).

Quoique des modèles plus complexes aient été proposés, - notamment par Temps et Coulson (5) -, le rayonnement réfléchi par le sol est généralement supposé isotrope et proportionnel à l'éclairement global sur plan horizontal :

$$D_R = a \cdot H \cdot (1 - \cos s) / 2$$

Cette composante est, dans la majorité des cas, la plus faible des trois ; elle est liée à l'albédo a (coefficient de réflexion du sol environnant), qui peut être variable selon l'environnement, la saison... Elle se trouve de ce fait entachée

d'une erreur importante. Il paraît donc raisonnable de s'en tenir à l'hypothèse d'isotropie de cette composante.

Le principal problème, source des divergences essentielles entre modèles, est en fait lié au calcul du rayonnement diffus en provenance du ciel, D_T .

LE MODELE ISOTROPE (1)

Ce modèle, le plus ancien et le plus simple, est basé sur l'hypothèse que la luminance du ciel est constante en tout point.

L'éclairement diffus sur plan incliné, D_T , se calcule donc en fonction de l'éclairement diffus sur plan horizontal D par une formule simple, issue d'une intégration sur l'ensemble de la demi-sphère céleste :

$$D_T = D \cdot (1 + \cos s) / 2$$

LE MODELE HAY-WILLMOTT (2)

Ce modèle part de l'hypothèse que le rayonnement diffus du ciel est formé de deux composantes : une composante isotrope et une composante circumsolaire, assimilée pour le calcul au rayonnement direct. La proportion de la composante isotrope du diffus sur plan horizontal est égale à

$$F = 1 - K_T \cdot (1 - D/H)$$

où K_T est le taux de transmission par l'atmosphère de l'éclairement solaire global sur plan horizontal

$$K_T = H_0 / H$$

si l'on note H_0 l'éclairement reçu par un plan horizontal situé hors atmosphère ; celui-ci se calcule à partir

de la constante solaire I_0 et du facteur correctif de distance terre-soleil, r (cf. (14)) :

$$H_0 = r \cdot I_0 \cdot \sin h$$

Ceci conduit à

$$D_T / D = F \cdot (1 + \cos s) / 2 + (1 - F) \cdot \cos i / \sin h$$

Nous avons par ailleurs introduit une variante sur le modèle de Willmott, en faisant l'hypothèse que si $\cos i / \sin h < (1 + \cos s) / 2$, alors le diffus est complètement isotrope ($F = 1$). Cette variante est par la suite notée (2').

LE MODELE PEREZ (6)

Ce modèle récent suppose que le rayonnement diffus est la combinaison de trois composantes : une composante isotrope, une composante circumsolaire (non ponctuelle, de rayon angulaire α) et une composante en provenance de l'horizon, de hauteur angulaire ξ (Fig. 2) :

$$D_T / D = ((1 + \cos s) / 2 + 2(1 - \cos \alpha) (F_1 - 1) Z_C + 2 \xi \sin \xi' (F_2 - 1) / \pi) / (1 + 2(1 - \cos \alpha) (F_1 - 1) Z_H + (1 - \cos 2\xi) (F_2 - 1) / 2)$$

Z_C et Z_H sont respectivement les fractions de la région circumsolaire, vues depuis le plan incliné et le plan horizontal ; ξ' est l'angle de la normale du plan incliné avec le sommet de la bande horizontale.

Les proportions respectives F_1 et F_2 des composantes circumsolaire et horizontale sont fonctions de la hauteur du soleil, de l'intensité du rayonnement diffus sur plan horizontal et du rapport B/D . F_1 et F_2 sont données par intervalle (210 coefficients) ; de ce fait, ce modèle est

nettement plus complexe que les autres à mettre en oeuvre.

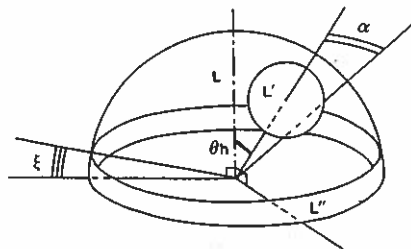


Fig. 2 : Modèle de luminance diffuse de Pérez. Représentation schématisée des différentes zones du ciel : L (isotrope), L' (circum-solaire) et L'' (horizontale). (d'après (6)).

Les valeurs de F1 et F2 ont été établies à partir de trois mois de mesures réalisées à Albany (Etat de New-York). Le modèle a ensuite été testé sur des périodes plus longues ainsi que sur des mesures réalisées à San Antonio (Texas) (10) (11).

LE MODELE PEPIN-BOSC (7)

Ce modèle, proposé par la Direction de la Météorologie, a été établi à partir d'une analyse statistique des mesures de Trappes et Carpentras (celles-là mêmes que nous avons utilisées pour la présente comparaison). Il suppose également l'existence de trois composantes : isotrope, DI, circumsolaire, DD, et zénithale, DZ. Les valeurs de ces trois composantes sont fonction uniquement du trouble généralisé de Linke T et de la hauteur du soleil, au moyen de formules analytiques du type suivant :

$$DD = (I_0/4,5) (\sin h)^{1/2} \\ \text{EXP } (-0,88 (\text{LOG } T - 0,7 \text{ LOG } (\sin h) - 2,64)^2)$$

$$DI = (I_0/4,5) (\sin h) \\ \text{EXP } (k - ((\text{LOG } T - 0,67 \text{ LOG } (\sin h) - 3,33)^2 + k^2)^{1/2}) \\ \text{où } k = 0,8/\sin h$$

CAS OU LE RAYONNEMENT DIFFUS EST INCONNU

Dans de nombreuses stations météorologiques, seul le rayonnement global sur plan horizontal est mesuré et la part respective des composantes diffuse et directe est inconnue. Pour remédier à cette absence, on utilise des formules empiriques, issues de l'analyse de données réelles et permettant de calculer approximativement chacune des deux composantes. Tel est le cas de la formule d'Orgill et Hollands (13) reliant la proportion de rayonnement diffus dans l'éclairement global sur plan horizontal au taux de transmission de ce dernier par l'atmosphère, K_T .

$$D/H = 1 - 0,249 \cdot K_T \\ \text{si } K_T < 0,35$$

$$D/H = 1,557 - 1,84 \cdot K_T \\ \text{si } 0,35 < K_T < 0,75$$

$$D/H = 0,177 \\ \text{si } K_T > 0,75$$

Dans le cadre de la présente étude, plusieurs autres modèles de reconstitution sur plan incliné ont été testés (3, 4, 5). Ils conduisent à des résultats moins précis que les modèles (2), (6) et (7). Le lecteur intéressé pourra se référer au rapport complet pour le détail des résultats sur ces autres modèles (15).

COMPARAISON CALCUL/MESURES DONNEES DISPONIBLES ET CRITERES DE COMPARAISON

La comparaison calcul/mesures a été réalisée à partir de trois années de données (1979-1981) disponibles à Trappes et Carpentras (7). Les paramètres suivants ont été utilisés :

- Eclairement global sur plan horizontal

- Eclairement direct en incidence normale

- Eclairement global sur deux plans orientés au sud et d'inclinaison respectives 45 et 90° (après soustraction de la composante diffuse, réfléchi par le sol).

Les mesures originales ont été effectuées avec un pas de temps de six minutes (valeurs intégrées) ; nous les avons agrégées en sommes horaires.

Après élimination des données douteuses ou manquantes, ce sont finalement 9900 valeurs horaires à Carpentras et 6600 à Trappes qui ont été utilisées.

Plusieurs critères de comparaison modèles/mesures ont été mis en oeuvre :

- Ecart moyen relatif sur l'ensemble de la période considérée, e_A . Il donne la précision de la reconstitution de la moyenne à long terme.

- Ecart quadratique moyen, S_A ; c'est un indicateur de la dispersion des écarts sur l'ensemble de la période.

- Ecart moyen relatif mensuel, e_M . Indicateur analogue à e_A (période de référence plus courte) il permet de vérifier si n'apparaissent pas des biais saisonniers. Nous n'avons porté dans les tableaux de résultats que la fourchette des valeurs minimale et maximale de e_M .

Par ailleurs, on sait que, pour de nombreux systèmes de conversion de l'énergie solaire, la moyenne de l'énergie incidente pendant une période n'est pas la seule variable pertinente pour estimer les performances du système. En raison de la présence d'effets de seuils, on a introduit la notion d'énergie disponible, $0, H_T$, au-dessus d'une intensité

critique I_c (ou seuil). Il s'agit d'une notion analogue aux degrés-jours pour la température : l'énergie disponible est la somme des écarts (pris uniquement quand ils sont positifs) entre l'énergie incidente et l'énergie correspondant au seuil I_c (12) (15).

On notera la notion d'utilisabilité U qui en découle, c'est-à-dire la proportion de l'irradiation moyenne sur une période, H_T , disponible au-dessus d'un seuil d'éclairement donné.

Un autre critère de comparaison modèle/mesures peut être ainsi l'écart sur l'énergie disponible au-dessus d'un seuil donné. Nous avons calculé cet écart relatif annuellement (e_A) et mois par mois (e_M) pour un seuil de 300 W/m², ainsi que la fourchette des valeurs mini/maxi.

LES RESULTATS DE LA COMPARAISON

Les résultats sont synthétisés dans le tableau I. Quatre ensembles de données y figurent (Plans : 45 et 90° ; Stations : Trappes et Carpentras). Les valeurs des différents indicateurs d'écart définis ci-dessus y ont été portés.

Le modèle isotrope (1), comme on s'y attendait, sous-estime de manière générale le rayonnement global sur plan incliné (environ 10 % dans les 4 cas). Les biais saisonniers sont importants : l'erreur la plus grande apparaît en hiver (jusqu'à 25 % d'erreur sur la moyenne mensuelle sur un plan vertical à Trappes), alors que l'erreur en été est faible. La dispersion est très forte (Ecart quadratique : 15 à 17 J/cm²). La reconstitution de l'énergie disponible est, elle aussi, biaisée et imprécise.

La figure 3, comparaison des

valeurs horaires mesurées et calculées dans un cas, montre bien le biais systématique du modèle.

Le modèle Hay-Willmott (2), avec une erreur systématique moyenne (- 4 à

- 6 %) permet d'améliorer à la fois la précision générale de la reconstitution, mais aussi la dispersion (9 à 10 J/cm²) ; les biais saisonniers sont beaucoup plus faibles, surtout à Carpentras. Ceci nous avait d'ailleurs incité à sélectionner ce modèle, lors

Tableau I : Analyse de différents algorithmes de reconstitution de l'éclairement solaire global sur plan incliné : (1) Isotrope, (2) Hay-Willmott, (2') Hay-Willmott (Variante), (6) Pérez, (7) Pépin-Bosc, (6') Pérez + Orgill-Hollands. Les valeurs de différents critères de comparaison modèle/mesure y figurent :

- A écart relatif moyen annuel
- SA écart quadratique moyen (sur les irradiances horaires)
- M fourchette mini/maxi des écarts relatifs moyens mensuels
- A écart relatif moyen annuel sur la reconstitution de l'énergie disponible au-dessus du seuil 300 W/m²
- M fourchette mini/maxi des écarts relatifs moyens mensuels sur la reconstitution de l'énergie disponible (même seuil).

ALG.	CARPENTRAS			90°			CARPENTRAS			45°		
	EA	SA	EM	E'A	E'H		EA	SA	EM	E'A	E'H	
	%	J/cm ²	%	%	%		%	J/cm ²	%	%	%	
/1/	-10.8	15.9	-16/-3	-26.6	-30/-18		-8.2	17.1	-13/-4	-14.9	-22/-7	
/2/	-7.0	10.4	-12/-3	-13.2	-46/-5		-4.7	13.3	-7/-4	-8.1	-12/-6	
/2'/	-5.3	9.3	-9/-3	-12.3	-26/-5		-4.4	10.1	-7/-3	-8.0	-11/-5	
/6/	+0.3	6.1	-1/+3	+0.2	-3/+10		-1.3	6.1	-3/0	-2.5	-6/-1	
/7/	-3.1	10.4	-12/+3		-46/+3		-4.2	13.7	-6/0		-10/-2	
/6'/	-0.5	13.2	-5/+4	-2.7	-12/+12		-1.4	11.4	-6/0		-12/+1	

ALG.	TRAPPES			90°			TRAPPES			45°		
	EA	SA	EM	E'A	E'H		EA	SA	EM	E'A	E'H	
	%	J/cm ²	%	%	%		%	J/cm ²	%	%	%	
/1/	-11.0	14.7	-24/+2	-36.8	-49/-33		-9.5	14.8	-20/-4	-21.2	-45/-13	
/2/	-7.0	9.6	-12/-2	-19.2	-18/-7		-6.1	9.4	-11/-4	-11.8	-12/-7	
/2'/	-6.1	9.3	-12/+2	-19.1	-18/-9		-5.3	9.3	-11/-3	-11.7	-12/-9	
/6/	+0.1	5.8	-3/+2	-2.1	-6/0		-2.0	5.5	-5/-1	-2.8	-6/0	
/7/	-1.9	9.1	-7/+3		-10/+1		-3.4	12.9	-6/-1		-10/+1	
/6'/	+1.3	12.3	-3/+5	-2.1	-16/+7		-0.7	8.4	-5/0	-1.4	-14/-2	

d'une première comparaison (12) basée sur les seules données de Carpentras, et avant la publication des modèles (6) et (7).

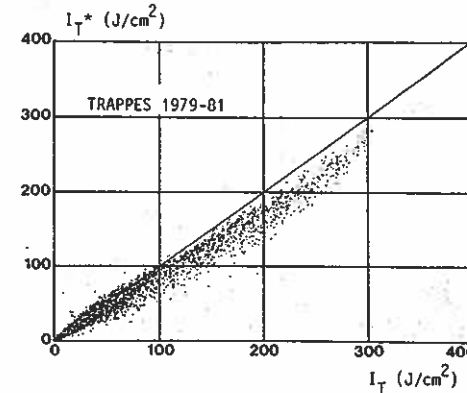


Fig. 3 : Comparaison des valeurs mesurées I_T et calculées I_T^* (par l'algorithme isotrope (1)) de l'irradiation globale horaire sur un plan vertical sud à Trappes.

La variante (2') améliore légèrement les résultats, surtout pour les plans verticaux en été.

Le modèle Pépin-Bosc (7) a une erreur annuelle raisonnable (- 2 à - 4 %), des biais mensuels faibles, comparables à ceux de Hay-Willmott ; il présente par contre une dispersion importante (9 à 14 J/cm²).

Le modèle Perez (6) s'avère, de loin, le meilleur puisqu'il réunit à la fois la précision globale (erreur annuelle - 1 à + 2 %), la précision instantanée (Ecart quadratique 5 à 6 J/cm²) et l'absence quasi totale de biais saisonniers. Il approche, du point de vue dispersion, la limite liée à la précision des mesures : à titre de comparaison, signalons qu'à Carpentras, l'écart quadratique de la reconstitution du global horizontal à partir du direct normal et du diffus horizontal est de 4 J/cm².

Cet algorithme permet une précision meilleure que 5 % (dans la quasi-totalité des cas : 3 %) sur la reconstitution des moyennes mensuelles et 10 % sur l'énergie mensuelle disponible au-dessus d'un seuil de 300 W/m².

La figure 4, comparaison de valeurs mesurées et calculées, donne une idée de la qualité du modèle.

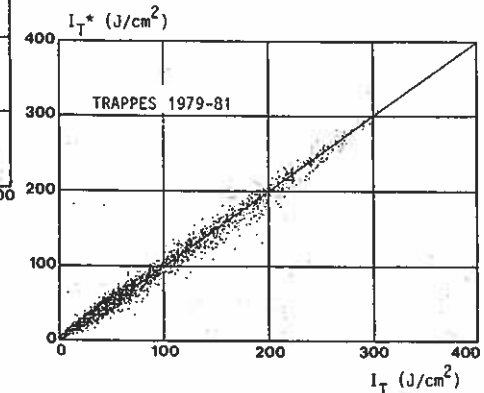


Fig. 4 : Comparaison des valeurs mesurées I_T et calculées I_T^* (par l'algorithme Pérez (6)) de l'irradiation globale horaire sur un plan sud à Trappes (1979-1981).

Plusieurs conclusions nous semblent devoir être tirées de ces comparaisons. Tout d'abord, l'algorithme classique (1) conduit à des erreurs importantes. Les autres algorithmes semblent bien adaptés aux climats français. Ceci est particulièrement intéressant pour les deux modèles développés à partir de l'analyse de données nord-américaines et laisse pressentir une large zone géographique de validité.

Le cas où ni le rayonnement direct, ni le rayonnement diffus ne sont connus, a été étudié en couplant le modèle Pérez (6) et le modèle d'Orgill/Hollands (13). Dans cette variante, notée (6'), on suppose

connue uniquement la valeur de l'éclairement global sur plan horizontal. La précision sur la reconstitution des moyennes est du même ordre que lorsque la valeur du rayonnement direct est connu (2 % au niveau annuel, 6 % au niveau mensuel). Par contre la dispersion est beaucoup plus forte : l'écart quadratique est doublé. Ceci indique que la reconstitution d'une valeur horaire donnée est entachée d'une erreur beaucoup plus importante. De même, l'erreur sur la reconstitution de l'énergie disponible au dessus du seuil 300 W/m² est plus importante (jusqu'à 10 ou 15 % au niveau mensuel). Néanmoins la conclusion se dégage que l'utilisation des équations d'Orgill et Hollands pour l'estimation de la composante diffuse sur plan horizontal, est justifiée et donne des résultats corrects.

CONCLUSIONS

On dispose donc aujourd'hui de modèles fiables pour le calcul du rayonnement sur des plans inclinés permettant une précision de 5 % sur l'estimation des moyennes mensuelles. Les sommes annuelles peuvent être déterminées à mieux que 2 % près. A titre de comparaison, le modèle isotrope classique entraîne une sous-estimation générale de 10 % et des erreurs mensuelles atteignant 25 % en hiver. Sur le plan physique, la séparation du rayonnement diffus du ciel en trois composantes, isotrope, circumsolaire et horizontale, semble une bonne représentation de la réalité.

Des améliorations de ces modèles nous semblent cependant possibles et surtout, - nous pensons particulièrement au modèle Pérez -, une simplification permettant une mise en oeuvre plus rapide à précision égale. Par ailleurs, même si une large validité géographique est à espérer, un certain nombre de généralisations restent à tester : que devient ce modèle dans

des conditions particulières, du point de vue climatique (zone tropicale par exemple) ou géographique (montagne, littoral) ?

Les applications sont nombreuses et touchent tous ceux qui s'intéressent à l'énergie solaire, quelque soit le type de méthodes qu'ils emploient. Il est tout d'abord possible d'envisager la préparation d'atlas du rayonnement solaire, comportant des données, sous forme de moyennes mensuelles, d'une grande précision. Par ailleurs, les concepteurs d'installations solaires qui ont besoin de "simuler" le fonctionnement énergétique de leurs systèmes à de faibles pas de temps, vont pouvoir bénéficier de données de rayonnement horaires très fiables. Enfin, les concepteurs qui se contentent de données agrégées à injecter dans des méthodes simplifiées, comme la distribution de fréquences de l'éclairement solaire, vont également bénéficier de données plus fiables (15).

BIBLIOGRAPHIE

(1) B.Y.H. Liu and R.C. Jordan
"A rational procedure for predicting the longterm average performance of flat-plate solar energy collectors". *SOLAR ENERGY* Vol. 7, n° 2, pp. 53-74 (1963).

(2) C.J. Willmott
"On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors". *SOLAR ENERGY* Vol. 28, N° 3, pp. 205-216 (1982).

(3) G.J. Vandenbrink
"Climatology of solar irradiance on inclined surfaces" *CEC Report ESF-006-80 NL. TPD-TWO, Delft* (1982).

(4) T.M. Klucher
"Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces" *SOLAR ENERGY* Vol. 23, n° 2, pp. 111-114 (1979).

(5) R.C. TEMPS and K.L. Coulson
"Solar radiation incident upon slopes of different orientations" *SOLAR ENERGY* Vol. 19, n° 2, pp. 179-184 (1977).

(6) R.R. PEREZ, J.T. Scott and R. Stewart
"An anisotropic model for diffuse radiation incident on slopes of different orientations and possible applications to CPC's" *Proc. of ASES, Progress in Solar Energy*, Vol. 6 (1983).

(7) M.H. PEPIN-Bosc, D. Goetz et S. Janicot "Evaluation du rayonnement diffus du ciel" *Compte-rendu du colloque "Météorologie et énergies renouvelables"*, Valbonne (1984).

(8) P. Valko
"Some empirical properties of solar radiation and related parameters" *Swiss Meteorological Institute, Zurich* (1980).

(9) M.D. Steven
"Angular distribution and interception of diffuse solar radiation" *Ph. D. Thesis, University of Nottingham* (1977).

(10) R. Stewart and R. Pérez
"Validation of an anisotropic model estimating insolation on tilted surfaces" *Proc. of ASES, Prog. in solar En.*, Vol. 7 (1984).

(11) R.R. Pérez, J.T. Scott and R. Stewart
"An anisotropic model of diffuse solar radiation with application to an

optimization of compound parabolic concentrators" *ASRC, State University of New-York, Albany. USDOE Report* (1983)

(12) B. Bourges et F. Lasnier
"Courbes de fréquences cumulées de l'éclairement solaire global : développement et validation d'une méthode de calcul pour les plans inclinés" C. - R. du colloque "Météorologie et énergies renouvelables", Valbonne (1984).

(13) J.F. Orgill and K.G. Hollands
"Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface" *SOLAR ENERGY*, Vol. 19, n° 4, pp. 357-359 (1977).

(14) Ch. Perrin De Brichambaut et Ch. Vauge
"Le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétique", *Ed. Tec et Doc, Paris*, 221 p. (1982).

(15) B. Bourges et R. Bonfils
"Etude des courbes de fréquences cumulées de l'éclairement solaire global reçu par des surfaces inclinées : Préparation d'un atlas pour la France" *Rapport AFME-ARMINES n° 3. 350.3168* (1985).

REMERCIEMENTS

Ces résultats sont le fruit d'une étude menée conjointement par le Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris et M. Bernard Bourges.

Cette étude n'aurait pu être menée à bien sans le soutien actif de la Commission des Communautés Européennes (Contrat ESF-008-F) et de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (Contrat AFME 3.350.3168). Nous tenons à remercier également la Direction de la Météorologie qui a aimablement mis à notre disposition les données de mesures de référence.

NOMENCLATURE

a	Albedo du sol
B	Irradiation solaire directe horaire en incidence normale (J/cm^2)
B _T	Irradiation directe sur plan incliné
D	Irradiation solaire diffuse horaire sur plan horizontal
D _R	Irradiation diffuse, réfléchie par le sol
D _T	Irradiation solaire diffuse horaire sur plan incliné
e _A	Ecart relatif annuel entre valeurs mesurées et valeurs calculées de l'irradiation globale sur plan incliné
e' _A	Ecart relatif annuel entre valeurs mesurées et valeurs calculées de l'énergie disponible sur plan incliné au dessus d'un seuil de $300 W/m^2$
e _M	Ecart relatif mensuel entre valeurs mesurées et valeurs calculées de l'irradiation globale sur plan incliné
e' _M	Ecart relatif mensuel entre valeurs mesurées et calculées de l'énergie disponible sur plan incliné au-dessus d'un seuil de $300 W/m^2$
h	Hauteur du soleil
H	Irradiation solaire globale horaire sur plan horizontal
H _O	Irradiation sur plan horizontal hors atmosphère
i	Angle d'incidence du rayonnement direct sur le plan récepteur
I _C	Eclairement de seuil (W/m^2)
I _O	Constante solaire
K _T	Taux de transmission par l'atmosphère du rayonnement global sur plan horizontal (Indice de clarté)
r	Facteur correctif de distance terre-soleil
s	Inclinaison du plan récepteur
s _A	Ecart quadratique moyen entre valeurs mesurées et valeurs calculées de l'irradiation solaire globale horaire sur plan incliné (J/cm^2)

